

KARAKTERISASI SIFAT OPTIK LAPISAN TIPIS a-Si:H:B UNTUK BAHAN SEL SURYA

Bambang Siswanto, Wirjoadi, Tri Mardji Atmono, Yunanto

Puslitbang Teknologi Maju Batan Yogyakarta
Jl. Babarsari Kotak Pos 6101 Ykbb, Yogyakarta 55281

ABSTRAK

KARAKTERISASI SIFAT OPTIK LAPISAN TIPIS a-Si:H:B UNTUK BAHAN SEL SURYA. Telah dideposisikan lapisan tipis a-Si:H:B pada substrat kaca dengan menggunakan teknik plasma sputtering DC. Deposisi dilakukan untuk beberapa parameter proses yang meliputi: waktu deposisi, tekanan gas dan suhu substrat dengan tujuan dapat diperoleh beberapa lapisan tipis a-Si:H:B yang mempunyai sifat optik yang sesuai untuk bahan sel surya. Variasi waktu deposisi (0,5 s.d 2 jam), tekanan gas (1,1 s.d $1,4 \times 10^{-1}$ torr) dan suhu substrat (150 s.d 300 °C), sedangkan aliran gas reaktif hidrogen ditetapkan sebesar 4 sccm. Target dari bahan silikon yang telah dicampur boron dengan konsentrasi (0,1, 0,3, 0,50, 0,7) % berat. Dari analisa sifat optik menggunakan spektrofotometer UV-Vis diperoleh transmitansi optik maksimum 47 % yang diperoleh pada panjang gelombang 700 nm. Koefisien serapan dan lebar energi gap untuk lapisan tipis a-Si:H:B masing-masing sebesar $3,49 \times 10^4 \text{ m}^{-1}$ dan 1,77 eV. □

Kata kunci: Sputtering, lapisan tipis, sifat optik

ABSTRACT

CHARACTERIZATION OF OPTICAL PROPERTIES a-Si:H:B THIN FILM FOR SOLAR CELL MATERIAL. The a-Si:H:B thin films were deposited on the glass substrate using plasma DC sputtering technique. The deposition has been done with the following process parameters: the deposition time, gas pressure and substrate temperature with the aim to obtain the optical properties of a-Si:H:B thin films suitable for solar cell material. Variations of deposition time were 0.5 to 2-hour, gas pressure 1.1 to 1.4×10^{-1} torr and substrate temperature 150 to 300 °C, while the flow rate of the reactive hydrogen was kept constant at 4-sccm. The targets of silicon material were mixed with boron for concentration at (0,1; 0,3; 0,5; 0,7 %). From the optical analysis using UV-Vis spectrophotometer, it was obtained that the maximum optical transmittance of a-Si:H:B thin film at 700 nm wavelength is 47 %. At this conditions, the absorption coefficient is $3.49 \times 10^4 \text{ m}^{-1}$ and the band gap energy of the a-SiH:B is 1.77 eV.

Key word : Sputtering, thin film, optical properties

PENDAHULUAN

Pada saat ini semikonduktor amorf dan paduannya (*alloy*), pada khususnya peralatan optoelektronik telah mengalami perubahan sangat pesat sesuai dengan konsep perkembangan terbaru. Penggunaan silikon amorf (a-Si) dalam pembuatan sel surya memiliki beberapa kelebihan dibandingkan dengan silikon kristal, diantaranya memiliki koefisien absorpsi yang sangat tinggi ($> 10^5 \text{ Cm}^{-1}$). Pada sebagian besar spektrum tampak memungkinkan pembuatan lapisan yang sangat tipis, dan dapat ditumbuhkan pada temperatur yang rendah dan lebih mudah dilakukan sehingga biaya produksi dapat ditekan. Namun a-Si tidak mempunyai keteraturan jangka panjang (*long range order*) meskipun terdapat keteraturan jangka pendek (*short range order*) dalam ikatannya. Hal ini karena a-Si banyak memiliki ikatan kosong (*dangling bonds*) yang bisa dikurangi dengan menambahkan atom-atom hidrogen pada saat proses deposisi sehingga terbentuk a-Si:H (*Hydrogenated Amorphous Silicon*).^[1,2]

Peningkatan efisiensi sel surya berbasis silikon amorf terutama untuk mengoptimalkan kualitas lapisan tipis pada bagian semikonduktor *pin* sel surya, bagian tersebut merupakan bagian utama untuk mengubah energi surya menjadi energi listrik. Jika kualitas pada pembuatan lapisan tipis semikonduktor *pin* ini baik maka efisiensi sel surya dapat meningkat antara 5-21 %. Sedangkan konsentrasi dopan boron atau fosfor dapat mempengaruhi tipe dari lapisan tipis yang terbentuk, sehingga konsentrasi elektron dan *hole* dapat dikontrol.^[3,4,5] Biasanya lebar celah energi pada semikonduktor *pin* juga sangat berpengaruh pada besarnya efisiensi konversi dari sel surya, juga disyaratkan mempunyai tingkat absorpsi yang tinggi sehingga efek *photovoltaic* yang diperoleh dapat optimum.

Untuk mempersiapkan bagian komponen dari sel surya lapisan tipis digunakan metode *sputtering*, dimana bahan target Si:B dideposisikan di atas substrat kaca dengan menambahkan gas reaktif hidrogen selama proses deposisi. Dan dalam penelitian ini diharapkan diperoleh parameter proses yang optimum dalam pembuatan

lapisan tipis a-Si:H:B, hal ini akan ditunjukkan dari hasil karakterisasi sifat optiknya. Selain itu diharapkan pula dapat diperoleh bahan lapisan tipis semikonduktor yang mempunyai koefisien absorpsi yang memadai jika digunakan untuk komponen sel surya yaitu semikonduktor yang mempunyai celah energi (energi optik) yang berkisar antara 0,5 – 3,3 eV.

TATA KERJA

Dalam penelitian ini dilakukan beberapa tahapan yang meliputi, preparasi cuplikan dan target, proses deposisi, dan karakterisasi hasil deposisi.

Persiapan Target dan Preparasi Cuplikan

Bahan utama yang disiapkan dalam percobaan ini adalah bahan target dari bahan silikon yang dicampur dengan unsur boron untuk beberapa ukuran berat (0,02; 0,06; 0,10; 0,14 g), kemudian dicetak dan dipres dengan tekanan tertentu sehingga terbentuk target *sputtering* dengan diameter 60 mm tebal 3 mm. Sedangkan substrat terbuat dari bahan kaca preparat yang dipotong dengan ukuran $10 \times 20 \times 1 \text{ mm}^3$, bekas potongannya dihaluskan dengan menggunakan kertas abrasif. Kemudian proses pencucian substrat secara berturut-turut dilakukan; pertama dengan air deterjen untuk menghilangkan adanya kontaminasi senyawa organik maupun nonorganik pada permukaan substrat yang mungkin timbul pada pengerjaan sebelumnya, lalu dengan air bersih dan alkohol dalam *ultrasonic cleaner*, kemudian dikeringkan dalam oven dan selanjutnya dibungkus dengan kertas tisu dan dimasukkan ke dalam kantong plastik.

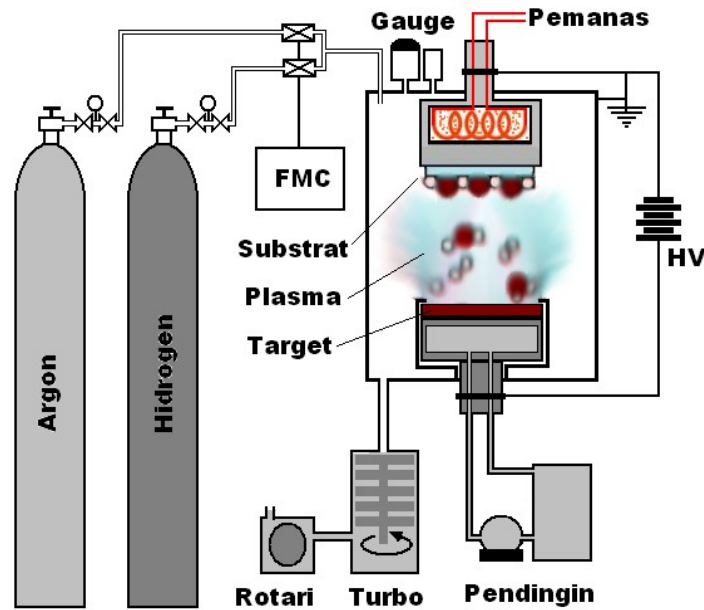
Proses Pendeposisian Lapisan Tipis a-Si:H:B

Apabila tabung reaktor plasma diisi gas argon dengan tekanan 0,1 – 0,01 torr, kemudian diberi tegangan dc beberapa kilovolt maka akan terjadi plasma lucutan pijar. Ion-ion argon yang terbentuk dalam plasma lucutan pijar dipercepat menuju ke katoda dan menumbuk permukaan target sehingga menimbulkan peristiwa *sputtering*. Bahan target yang tersputter kemudian terdeposit pada permukaan substrat, sedangkan kualitas dan sifat-sifat lapisan tipis yang terdeposit pada permukaan substrat bergantung pada beberapa parameter *sputtering* antara lain : tekanan gas, waktu deposisi, suhu substrat, jarak elektrode, daya dan faktor geometri sistem elektrodanya.^[6,7] Interaksi ion-ion target energi tinggi hasil *sputter* dengan atom-atom sasaran akan menyebabkan bergesernya atom-atom sasaran dari posisi awalnya sehingga terbentuk kekosongan (*vacancies*). Atom-atom target yang tersputter bertumbukan dengan molekul-molekul gas dan akhirnya tersebar pada permukaan karena tekanan gas sangat tinggi dan jalan bebas rata-rata dari partikel-partikel yang tersputter kurang dari jarak elektroda maka atom-atom target yang terhambur akan menempati ruang kosong di sekitarnya secara sisipan (*interstition*) dan masuk ke dalam permukaan substrat secara difusi.

Peralatan sistem deposisi yang digunakan adalah plasma *sputtering* DC. Komponen utama dari sistem yang digunakan dalam penelitian ini adalah :

- tabung reaktor plasma,
- sistem elektrode (terdiri dari sepasang elektrode yang dipasang sejajar, satu sebagai tempat substrat dan yang satu sebagai tempat target),
- sistem catu daya tegangan tinggi DC,
- sistem vakum turbo-molekular, rotari dan meter vakum,
- sistem pendingin target dan pemanas substrat,
- sumber gas argon, hidrogen dan sistem aliran gas ke tabung plasma.

Dalam proses deposisi substrat dan target diletakkan pada elektrode di dalam tabung reaktor seperti terlihat pada Gambar 1, lalu dihampakan dengan sistem vakum rotari dan turbo. Selanjutnya sistem pemanas dan sistem pengontrol aliran gas diatur sesuai parameter yang dikehendaki, kemudian catu daya tegangan tinggi DC dihidupkan sampai gas argon dalam tabung reaktor terionisasi. Target *sputtering* yang digunakan adalah paduan Si:B dengan konsentrasi dopan boron secara bergantian diletakkan pada sistem elektrode dengan beberapa variasi parameter proses *sputtering*, antara lain : waktu deposisi 0,5; 1; 1,5; 2 jam, tekanan gas $1,1 \times 10^{-1}$; $1,2 \times 10^{-1}$; $1,3 \times 10^{-1}$; $1,4 \times 10^{-1}$ torr, dan suhu substrat 100, 150, 200, 250 °C dengan aliran gas reaktif hidrogen dibuat konstan sebesar 4 sccm.



Gambar 1. Skema Peralatan Plasma Sputtering DC.

Karakterisasi Lapisan Tipis a-Si:H:B Hasil Deposisi

Karakterisasi sifat optik dilakukan dengan menggunakan spektrometer UV-Vis, di mana jika cahaya dilewatkan pada suatu material maka sebagian cahaya tersebut dipantulkan (*reflected*), dihamburkan (*scattered*), diserap (*absorbed*) dan sebagian diteruskan (*transmitted*). Pada prinsipnya spektrometer UV-Vis ini adalah membandingkan cuplikan dan standar, dalam hal ini yang digunakan sebagai standar adalah kaca preparat. Dari spektrum yang didapat menunjukkan hubungan antara transmitansi dengan panjang gelombang (λ), kemudian tebal dari lapisan tipis dihitung dengan pendekatan persamaan^[8] :

$$d = \frac{1}{2n_1 \left(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2} \right)} \quad (1)$$

dengan d (m) adalah tebal lapisan tipis, λ_1 (m) dan λ_2 (m) adalah pajang gelombang pada puncak spektrum pertama dan kedua, sedangkan n_1 adalah indeks bias lapisan yang dirumuskan dengan persamaan :

$$n_1 = \frac{(1 + n_o) + \sqrt{(1 + n_o)^2 - 4n_o T_o}}{2\sqrt{T_o}} \quad (2)$$

dengan n_o adalah indeks bias kaca (1,5) dan T_o adalah transmitansi minimum (%).

Untuk menentukan lebar celah optik digunakan metode *Touc-plot* yang dituliskan hubungan antara koefisien absorpsi dengan energi foton dengan persamaan :

$$\sqrt{\alpha h\nu} = B(h\nu - E_{Opt}) \quad (3)$$

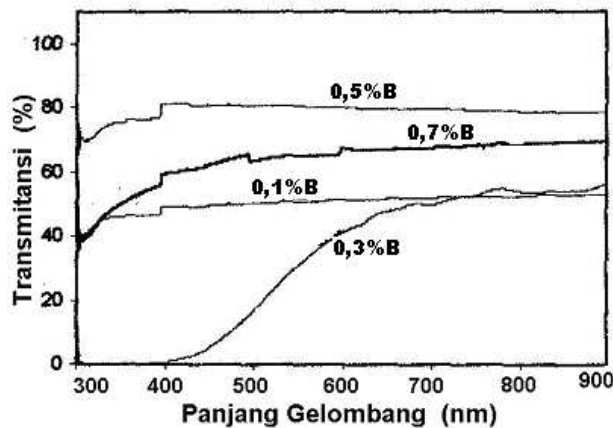
dengan h adalah konstanta Planck, $\nu = \frac{C}{\lambda}$, B adalah konstanta yang tergantung pada material dan E_{Opt} adalah celah energi (eV) dan koefisien absorpsi α (m^{-1}) dapat ditentukan melalui persamaann :

$$\alpha = \frac{\ln T}{d} \quad (4)$$

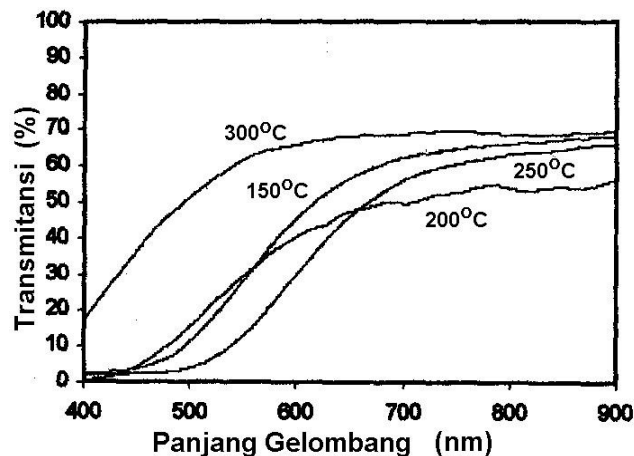
dengan T adalah transmitansi optik (%).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Karakterisasi sifat optik telah dilakukan dalam panjang gelombang ultraviolet–sinar tampak (300 - 800 nm) dengan spektrometer UV-Vis, hal ini karena pada panjang gelombang tersebut bersesuaian dengan panjang gelombang sinar matahari. Spektrum karakterisasi UV-Vis untuk berbagai variasi parameter proses *sputtering* ditunjukkan pada Gambar 2, 2, 3, 4 dan 5, sedangkan grafik plot untuk menentukan lebar celah optik ditunjukkan pada Gambar 6.



Gambar 2. Spektrum transmitansi optik lapisan tipis a-Si:H:B untuk berbagai konsentrasi dopan boron pada suhu substrat 200 °C, tekanan gas $1,4 \times 10^{-1}$ torr dan waktu deposisi 1,5 jam.

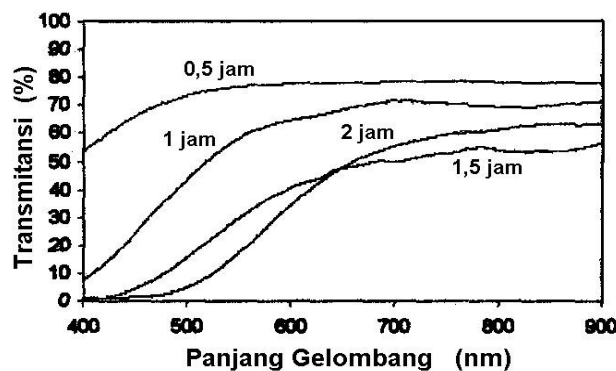


Gambar 3. Spektrum transmitansi optik lapisan tipis a-Si:H:B untuk ber-bagai suhu substrat pada tekanan gas $1,4 \times 10^{-1}$ torr, waktu deposisi 1,5 jam dan konsentrasi dopan boron 0,3 %.

Gambar 2 menunjukkan spektrum transmitansi optik lapisan tipis a-Si:H:B untuk berbagai konsentrasi dopan boron pada suhu substrat 200 °C, tekanan gas $1,4 \times 10^{-1}$ torr dan waktu deposisi 1,5 jam. Dari gambar tersebut diperoleh berbagai spektrum pengamatan UV-Vis. Pada konsentrasi dopan boron diperoleh lapisan tipis a-Si:H:B yang cukup bervariasi, hal itu dibuktikan dengan diperolehnya nilai transmitansi yang bervariasi juga. Pada panjang gelombang 700 nm diperoleh nilai transmitansi sebesar 47 %, 55%, 66 % dan 80% masing-masing untuk konsentrasi dopan boron 0,3; 0,1; 0,5 dan 0,7 %, hal ini menggambarkan bahwa tingkat absorpsi maksimum untuk lapisan tipis a-Si:H:B diperoleh untuk konsentrasi dopan boron sebesar 0,3 %. Pada penumbuhan lapisan tipis semikonduktor a-Si:H:B, faktor dopan pengotor (*impurity*) seperti boron adalah untuk mengontrol keberadaan elektron dan hole dan membuat semikonduktor a-Si:H:B tipe p yaitu kelebihan *hole*. Selain itu kesesuaian

konsentrasi dopan boron tersebut juga mempengaruhi kualitas lapisan tipis yang terbentuk, artinya atom-atom target dapat terdepositasi secara merata (homogen) dan sebagai akibatnya mempengaruhi transmitansi optik.

Gambar 3 menunjukkan spektrum transmitansi optik lapisan tipis a-Si:H:B untuk berbagai suhu substrat pada tekanan gas $1,4 \times 10^{-1}$ torr, waktu deposisi 1,5 jam dan konsentrasi dopan boron 0,3 %. Pada suhu substrat 200°C diperoleh kualitas lapisan tipis a-Si:H:B yang cukup baik ditinjau dari nilai transmitansi optik yang paling rendah dibandingkan pada suhu substrat yang lainnya. Pada panjang gelombang 700 nm diperoleh nilai transmitansi optik sebesar 47 %, 55%, 60 % dan 67% untuk masing-masing suhu substrat 200 °C, 250 °C, 150 °C dan 300 °C, hal ini menggambarkan tingkat absorpsi maksimum diperoleh untuk lapisan tipis a-Si:H:B pada suhu substrat 200 °C. Selama deposisi suhu substrat sangat mempengaruhi proses difusi dari atom-atom target tersputer terdeposit pada substrat. Dalam hal ini karena suhu substrat akan menyebabkan bergetarnya atom-atom permukaan substrat dan sebagai akibatnya jarak antar bidang merenggang sehingga mempermudah proses penyisipan (*interstition*). Pada kenaikan suhu substrat antara 150 – 200 °C diperoleh nilai transmitansi yang menurun, ini mengindikasikan bahwa hasil lapisan tipis pada suhu 200 °C lebih rapat daripada suhu substrat 150°C, hal ini serupa jika suhu substrat dinaikkan lagi menjadi 250 °C. Namun demikian jika suhu substrat dinaikkan lagi menjadi 300 °C justru dihasilkan lapisan tipis yang lebih transparan itu dibuktikan dengan naiknya nilai transmitansi optik, hal ini kemungkinan terjadi kejenuhan proses penyisipan atom-atom tersputer dan akibatnya terjadi lapisan yang tidak rapat/porous.

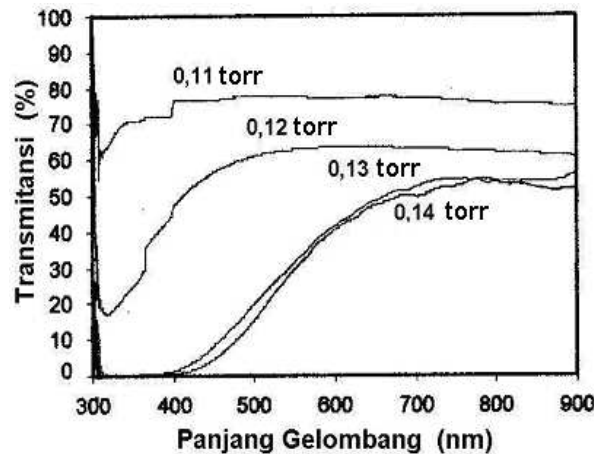


Gambar 4. Spektrum transmitansi optik lapisan tipis a-Si:H:B untuk berbagai waktu deposisi pada suhu substrat 200 °C, tekanan gas $1,4 \times 10^{-1}$ torr dan konsentrasi dopan boron 0,3 %.

Gambar 4 menunjukkan spektrum transmitansi optik lapisan tipis a-Si:H:B untuk berbagai waktu deposisi pada suhu substrat 200°C, tekanan gas $1,4 \times 10^{-1}$ torr dan konsentrasi dopan boron 0,3 %. Pada waktu deposisi 1,5 jam diperoleh lapisan tipis a-Si:H:B yang cukup tebal, bila ditinjau dari nilai transmitansi optik yang minimum dibandingkan pada waktu deposisi yang lainnya. Pada panjang gelombang 700 nm diperoleh nilai transmitansi sebesar 47 %, 56%, 70 % dan 80% untuk masing-masing waktu deposisi 0,5 jam; 1 jam; 1,5 jam; dan 2 jam, hal ini menggambarkan tingkat absorpsi maksimum diperoleh untuk lapisan tipis a-Si:H:B pada waktu deposisi 1,5 jam. Pada waktu deposisi 0,5 jam maka lapisan a-Si:H:B yang terbentuk masih sangat tipis, sehingga memberikan informasi transmitansi yang tinggi. Dan jika waktu deposisi dinaikkan maka lapisan a-Si:H:B yang terbentuk juga semakin tebal, hal itu sesuai dengan tingkat transmitansi yang ditunjukkan semakin menurun. Tetapi jika waktu deposisi dinaikkan hingga 2 jam maka nilai transmitansinya juga menurun hal itu selaras dengan ketebalan lapisan tersebut, namun jika dibandingkan dengan waktu deposisi 1,5 jam justru transmitansinya lebih tinggi hal ini kemungkinan adanya *porous* pada lapisan tipis yang terbentuk akibat adanya sputtering balik (*back sputtering*).

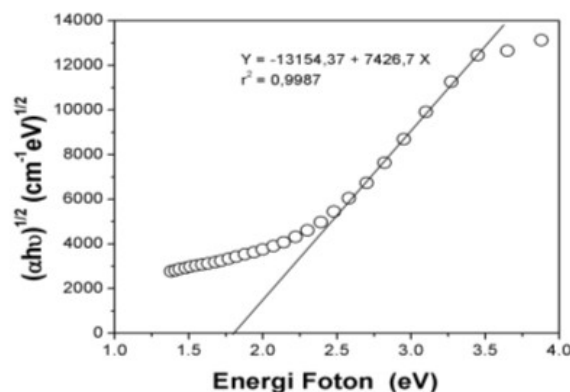
Gambar 5 menunjukkan spektrum transmitansi optik lapisan tipis a-Si:H:B untuk berbagai tekanan gas pada suhu substrat 200 °C, waktu deposisi 1,5 jam dan konsentrasi dopan boron 0,3 %. Pada tekanan gas 0,14 torr diperoleh lapisan tipis a-Si:H:B yang cukup tebal ditinjau dari nilai transmitansi optiknya yang minimum dibandingkan pada tekanan gas yang lainnya. Pada panjang gelombang 700 nm diperoleh nilai transmitansi sebesar 47 %, 50%, 60 % dan 77% masing-masing untuk tekanan gas $1,4 \times 10^{-1}$; $1,3 \times 10^{-1}$; $1,2 \times 10^{-1}$ dan $1,1 \times 10^{-1}$ torr. Hal ini menggambarkan tingkat absorpsi maksimum diperoleh untuk lapisan tipis a-Si:H:B pada tekanan

gas $1,4 \times 10^{-1}$ torr. Jika tekanan gas dinaikkan maka rapat plasma meningkat sehingga energi sputternya juga meningkat dan sebagai akibatnya atom-atom tersputer ikut meningkat pula. Dengan demikian kebolehdan atom-atom tersebut terdeposit pada substrat lebih banyak sehingga hasil lapisan tipis yang diperoleh semakin rapat/tebal, hal ini terbukti dengan menurunnya nilai transmitansi optik sebagai akibat dari kenaikan tekanan gas



Gambar 5. Spektrum transmitansi optik lapisan tipis a-Si:H:B untuk berbagai tekanan gas pada suhu substrat 200 °C, waktu deposisi 1,5 jam dan konsentrasi dopan boron 0,3 %.

Cahaya yang datang mengenai permukaan lapisan tipis akan dipantulkan, diserap maupun diteruskan, namun pada pengamatan ini sinar yang direfleksikan/dipantulkan oleh permukaan adalah sangat kecil mendekati nol sehingga cahaya yang tidak diteruskan dianggap terserap oleh cuplikan. Pada Gambar 6 menunjukkan gambaran grafik koefisien absorpsi optik terhadap energi foton pada panjang gelombang 700 nm untuk lapisan tipis a-Si:H:B pada suhu substrat 200 °C, waktu deposisi 1,5 jam, tekanan gas $1,4 \times 10^{-1}$ torr dan konsentrasi dopan boron 0,3 %. Lebar celah energi (*bandgap energy*) untuk lapisan intrinsik (a-Si:H) biasanya antara 1.65–1.8 eV dan untuk mendapatkan efisiensi yang tinggi maka lebar celah energi dari a-Si:H:B setidaknya lebih besar dari pada a-Si:H^[2]. Dari kurva pada Gambar 6, lebar celah energi dari lapisan tipis a-Si:H:B dengan ketebalan 134,5 nm yang dievaluasi dari bagian data linier secara empirik didefinisikan dalam rumusan metode *Tauc-plot* dan diperoleh lebar celah energi sebesar 1,77 eV dan ini diperoleh pada waktu $h\nu = E_{Opt}$ dari ekstrapolasi data linier (persamaan 3). Pada energi foton yang tinggi diperoleh data yang sangat linier dengan korelasi $r^2 = 0,9987$ pada energi foton 2.5 – 3.5 eV, sedangkan pada energi rendah di bawah 2.5 eV maka data tidak linier lagi hal ini sepertinya berhubungan dengan pengaruh adanya kontribusi keadaan daerah terlokalisasi.



Gambar 6. Grafik koefisien absorpsi optik terhadap energi foton pada panjang gelombang 700 nm untuk lapisan tipis a-Si:H:B pada suhu substrat 200 °C, waktu deposisi 1,5 jam, tekanan gas $1,4 \times 10^{-1}$ torr dan konsentrasi dopan boron 0,3 %.

KESIMPULAN

Dari beberapa hasil karakterisasi untuk berbagai parameter proses dan perhitungan lebar celah energi dari lapisan tipis a-Si:H:B maka dapat disimpulkan bahwa,

- Parameter proses deposisi : waktu deposisi, tekanan gas dan suhu substrat sangat mempengaruhi kualitas hasil deposisi, terutama ketebalan dan homogenitas lapisan yang terbentuk dan menyebabkan transmitansi optik berbeda-beda.
- Nilai hasil transmitansi optik yang optimum adalah pada kondisi proses waktu deposisi 1,5 jam, tekanan gas $1,4 \times 10^{-1}$ torr dan suhu substrat 200 °C dan diperoleh nilai $T = 47 \%$ pada panjang gelombang 700 nm.
- Dari hasil perhitungan diperoleh ketebalan a-Si:H:B sebesar 134,68 nm dengan lebar celah energi 1,77 eV dan ini adalah cukup layak jika digunakan sebagai bahan sel surya terutama untuk bagian semikonduktor *pin*.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Sdri. Alfi Susilowati, Bapak Sumaji, Bapak Slamet Riyadi yang telah banyak membantu dalam pelaksanaan eksperimen sehingga dapat terselesainya penelitian ini, semoga Allah memberikan imbalan yang semestinya, Amin.

DAFTAR PUSTAKA

1. OHRING, M., The Material Science of Thin Films, Academic Press Inc, New York, 1986.
2. K. TAKAHASHI, M. KONAGAI, Amorphous Silicon Solar Cells, North Oxford Academic, 1986.
3. MATSUDA, A., "Amorphous Silicon From Glow Discharge Plasma", Proceeding International Workshop on the Physics Material VI, Jakarta, 1988.
4. A. DASGUPTA, et al, P-layer of Mycro-crystalline Silicon Thin Film Solar Cells, 16th European Photovoltaic Solar Energy Confe-rence and Exhibition, 2000, in print.
5. KAI ZHU, et al, Interfacial Optical in Amorpous Silicon Based Pin Solar Cells, Proceeding of the 28th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Anchorage, September 19-22, 2000.
6. KONUMA M, Film Deposition by Plasma Techniques, Springer Verlag, Berlin, 1992.
7. WASA, K., HAYAKAWA, S., Handbook of Sputter Deposition Technology: Principles, Technology and Application, Noyes Publication, New Jersey, 1992.
8. PARANGTOPO, MELIAWATI G. SISWANTO, Proceeding International Workshop on The Physics of Materials, University of Indonesia, Jakarta 1988.